



CATEGORIA 3 – VIA PERMANENTE

Aplicação do Método GPR em Ferrovias: Monitoramento Subsuperficial, Diagnóstico Geotécnico

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade e a segurança operacional das ferrovias dependem diretamente das condições dos elementos que compõem a via permanente. Embora trilhos, fixações e dormentes sejam acessíveis às inspeções visuais, grande parte dos processos que afetam o desempenho da ferrovia ocorre abaixo da superfície, no interior das camadas de lastro, sublastro, plataforma e subleito. Alterações nessas camadas podem evoluir progressivamente e permanecer pouco perceptíveis até se manifestarem na forma de defeitos geométricos, recalques, bombeamento de finos, trincas, perda de material ou redução da capacidade de suporte.

As solicitações dinâmicas produzidas pela circulação ferroviária, associadas às condições climáticas, à variabilidade dos materiais e ao funcionamento da drenagem, favorecem o desenvolvimento de alterações localizadas ou contínuas na infraestrutura. A entrada e a permanência de água podem aumentar a deformabilidade dos materiais, facilitar a migração de partículas finas e comprometer o comportamento das camadas de suporte. Da mesma



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

forma, a fuga de material, a formação de vazios e a deformação das interfaces podem redistribuir os esforços e acelerar a degradação da geometria da via.

Métodos tradicionais, como inspeções visuais, sondagens, trincheiras e coleta de amostras, são fundamentais para a caracterização geotécnica e para a confirmação direta das condições do terreno. Entretanto, normalmente fornecem informações pontuais. Em trechos extensos ou com elevada variabilidade lateral, poucos pontos investigados podem não representar adequadamente as condições existentes entre eles. Além disso, escavações e sondagens demandam recursos operacionais e podem interferir na circulação ferroviária.

Nesse contexto, métodos geofísicos não destrutivos podem fornecer informações contínuas ao longo da ferrovia, contribuindo para delimitar áreas de interesse e orientar investigações diretas posteriores. Entre esses métodos destaca-se o Ground Penetrating Radar (GPR), também denominado Georadar ou Radar de Penetração no Solo.

O GPR utiliza pulsos de ondas eletromagnéticas para investigar a subsuperfície. Parte da energia emitida é refletida ao encontrar contrastes nas propriedades elétricas dos materiais, sendo registrada e organizada em seções denominadas radargramas. Nessas seções podem ser analisadas a continuidade das interfaces, as variações laterais do sinal, a geometria das reflexões, as respostas hiperbólicas e as zonas de atenuação da energia eletromagnética.

Na infraestrutura ferroviária, essas respostas podem estar relacionadas a variações de espessura das camadas, alterações no lastro e no sublastro, concentrações de umidade, descontinuidades, objetos enterrados, vazios, perda de material ou modificações na estratigrafia da plataforma. Entretanto, o método não identifica diretamente a natureza geotécnica de uma anomalia. O GPR registra contrastes eletromagnéticos, cuja interpretação depende da geometria das respostas, da frequência utilizada, das condições de aquisição e das características construtivas e geológicas da área.

Por esse motivo, os resultados devem ser avaliados em conjunto com inspeções de campo, histórico de manutenção, informações sobre drenagem e, quando necessário, sondagens ou verificações diretas. O método deve ser compreendido como uma ferramenta complementar,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

capaz de ampliar a continuidade espacial das informações e auxiliar na seleção dos locais prioritários para investigações detalhadas.

A frequência das antenas representa um aspecto importante do planejamento. Antenas de maior frequência oferecem melhor resolução para as camadas superficiais, enquanto frequências menores tendem a alcançar maiores profundidades, porém com menor detalhamento. A utilização combinada de diferentes frequências permite investigar tanto alterações superficiais no lastro quanto feições mais profundas na plataforma e no subleito.

A aplicação do GPR em ambiente ferroviário também apresenta desafios específicos. Trilhos, fixações e outros componentes metálicos produzem reflexões intensas, enquanto os dormentes geram respostas periódicas nos radargramas. Solos argilosos, materiais saturados e meios com elevada condutividade elétrica podem provocar forte atenuação do sinal, reduzindo a profundidade efetiva de investigação. Essas condições exigem o planejamento de linhas em diferentes posições, incluindo perfis entre os trilhos, sobre os dormentes, nas laterais do lastro e em áreas externas à superestrutura.

Este artigo reúne resultados selecionados de levantamentos GPR realizados em diferentes trechos de ferrovias, nos quilômetros 378, 673 e 730. Os casos apresentam objetivos e condições distintas, permitindo demonstrar a aplicação do método tanto em investigações contínuas da via permanente quanto no detalhamento de problemas localizados.

No km 378, a investigação foi executada em um trecho submetido a restrições operacionais, onde existiam suspeitas de bolsões de água, fuga de material, trincas e alterações potencialmente relacionadas à estabilidade da via. Foram adquiridos perfis em duas linhas férreas, utilizando antenas de 400 MHz em diferentes posições sobre a superestrutura e antenas de 250/700 MHz nas laterais. Os resultados indicaram alterações na continuidade das interfaces, zonas associadas à umidade e variações na geometria do lastro e do sublastro.

No km 673, os levantamentos foram concentrados em um segmento que incluía uma estrutura de drenagem. Os radargramas obtidos em perfis paralelos indicaram uma zona de alteração próxima à drenagem, com mergulho das interfaces do lastro e do sublastro em sua



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

direção. Também foram identificadas áreas de maior umidade e alterações localizadas no sublastro, cuja repetição em diferentes perfis permitiu avaliar sua continuidade lateral.

No km 730, a investigação foi direcionada à avaliação de trincas existentes nas proximidades da ferrovia. Foram realizadas linhas longitudinais e transversais, principalmente fora do lastro, com o objetivo de reduzir a interferência dos dormentes e acompanhar a continuidade das feições. Os resultados apresentaram zonas de forte atenuação sobre as trincas e respostas semelhantes em perfis adjacentes, sugerindo a continuidade lateral do sistema de fraturamento e a migração do material empregado no preenchimento.

A seleção desses casos demonstra que a mesma tecnologia pode ser empregada em diferentes escalas, desde a investigação de centenas de metros da via até o detalhamento de feições localizadas, como trincas, drenagens e zonas de perda de material. A comparação entre perfis longitudinais, transversais e paralelos também permite avaliar a continuidade espacial das respostas, reduzindo interpretações baseadas em radargramas isolados.

O objetivo deste trabalho é apresentar a aplicação do GPR como ferramenta complementar para o diagnóstico da via permanente, com base em resultados obtidos em levantamentos ferroviários reais. Busca-se demonstrar sua capacidade para identificar variações estratigráficas, zonas de atenuação, alterações relacionadas à umidade, descontinuidades e deformações das interfaces, além de discutir as principais limitações do método.

A utilização adequada do GPR pode auxiliar na delimitação de áreas prioritárias, no planejamento de sondagens, na redução de escavações exploratórias e no acompanhamento de trechos submetidos a intervenções ou monitoramento. Dessa forma, o método amplia a continuidade espacial das informações disponíveis e fornece suporte técnico às decisões relacionadas à manutenção e à segurança da infraestrutura ferroviária.

2. DIAGNÓSTICO DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA

2.1 Via permanente e mecanismos de degradação



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O A via permanente constitui um sistema estrutural formado pela interação entre trilhos, fixações, dormentes, lastro, sublastro, plataforma ferroviária e subleito. As cargas produzidas pela circulação dos trens são transmitidas pelos trilhos e distribuídas progressivamente pelas camadas inferiores até o terreno de fundação. O desempenho do conjunto depende, portanto, da integridade dos elementos superficiais e também da espessura, continuidade, compactação e capacidade de suporte dos materiais localizados abaixo da via.



Figura 1 – Estratigrafia típica da via permanente e seus principais componentes.

A repetição das cargas dinâmicas, associada à entrada de água, à deficiência de drenagem e à heterogeneidade dos materiais, pode provocar rearranjo dos agregados, migração de partículas finas, perda de confinamento do lastro e deformação das interfaces. Entre as manifestações mais frequentes encontram-se a contaminação por finos, a saturação por água, o bombeamento de material, a formação de bolsões de lama, os recalques diferenciais, a fuga de material e a perda localizada de suporte. Esses processos podem evoluir sem manifestações superficiais evidentes em suas fases iniciais, tornando necessária a investigação das camadas internas da estrutura.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 2 – Principais manifestações de degradação que podem ocorrer na estrutura ferroviária.

2.2 Influência da água e da drenagem no comportamento da via

A água constitui um dos principais agentes associados à degradação das camadas de suporte ferroviário. Quando a drenagem superficial ou subsuperficial não remove adequadamente a água infiltrada, ocorre aumento da umidade no lastro, sublastro e subleito. Essa condição pode reduzir a resistência dos materiais, favorecer a retenção e a migração de partículas finas e contribuir para o desenvolvimento de deformações permanentes, bolsões de lama e perda de capacidade de suporte, conforme exemplificado na Figura 2.

Esses problemas podem se concentrar nas proximidades de canaletas, bueiros, galerias, pontos baixos da plataforma e trechos com drenagem deficiente. A circulação ferroviária sobre materiais excessivamente úmidos pode intensificar o bombeamento de finos e a fuga de material. Por isso, a análise das condições de drenagem deve considerar tanto as



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

manifestações observadas em superfície quanto possíveis alterações internas na geometria e na continuidade das camadas.

2.3 Limitações das inspeções pontuais

Sondagens, trincheiras, poços de inspeção e coleta de amostras fornecem informações diretas e são fundamentais para caracterizar os materiais que compõem a via permanente. Entretanto, seus resultados representam pontos específicos e podem não registrar adequadamente as variações existentes entre os locais investigados. Essa limitação é particularmente importante quando as alterações apresentam geometria irregular, continuidade lateral variável ou não produzem manifestações superficiais evidentes.

A definição dos pontos de investigação apenas com base em inspeções visuais pode resultar em sondagens executadas fora da principal zona de alteração. Métodos capazes de produzir informações contínuas podem ser utilizados previamente para identificar mudanças no comportamento das camadas e orientar a localização das verificações diretas, aumentando sua representatividade e reduzindo intervenções exploratórias desnecessárias.

2.4 Potencial e limitações do GPR no ambiente ferroviário

O Ground Penetrating Radar permite obter perfis praticamente contínuos da subsuperfície e comparar as respostas registradas em diferentes posições da via. A análise dos radargramas pode auxiliar na identificação de variações de espessura, deformações das interfaces, zonas de atenuação, respostas pontuais e descontinuidades no lastro, sublastro e materiais subjacentes. A execução de perfis paralelos e transversais também permite avaliar a continuidade lateral das feições e delimitar os setores prioritários para investigações complementares.

Entretanto, os resultados dependem das propriedades eletromagnéticas dos materiais e das características do ambiente ferroviário. Solos argilosos, materiais saturados ou com elevada condutividade podem limitar a penetração do sinal, enquanto trilhos, fixações, dormentes e outros elementos metálicos produzem reflexões e interferências. Além disso, uma anomalia



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

eletromagnética não confirma isoladamente uma patologia específica. Sua interpretação deve considerar a geometria das respostas, sua repetição entre diferentes perfis e a integração com inspeções de campo, informações geotécnicas, estruturas de drenagem e registros de manutenção.

3. METODOLOGIA DOS LEVANTAMENTOS

Os resultados apresentados foram obtidos em três campanhas independentes de GPR aplicado em ferrovias, nos quilômetros 378, 673 e 730. Como os trechos apresentavam problemas e condições distintas, as configurações de aquisição foram adaptadas à geometria da via, à profundidade de interesse e ao tipo de alteração investigada. Foram combinadas antenas de diferentes frequências e perfis longitudinais e transversais, executados em diferentes posições da ferrovia.

3.1 Áreas investigadas

O primeiro estudo de caso corresponde ao km 378, no Maranhão. O levantamento abrangeu aproximadamente 500 m de duas linhas férreas em um trecho submetido a restrições operacionais, no qual havia suspeitas de acúmulo de água, fuga de material, trincas e alterações nas camadas de suporte. O objetivo foi investigar a continuidade do lastro e do sublastro e identificar zonas de umidade, respostas pontuais e deformações das interfaces.

O segundo levantamento foi realizado entre os marcos 673+400 e 673+600, também no Maranhão. O trecho incluía uma estrutura de drenagem localizada aproximadamente no km 673+495 e um talude adjacente. A campanha buscou avaliar as condições do lastro e do sublastro e verificar possíveis relações entre a drenagem, a presença de umidade e as alterações observadas nas interfaces da via.

O terceiro estudo foi executado entre os marcos 729+940 e 730+150, no Pará. A investigação concentrou-se em conjuntos de trincas próximos à ferrovia, alguns previamente preenchidos com material injetado. Os perfis foram planejados para avaliar a profundidade, a continuidade lateral das respostas e sua possível extensão em direção à via.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 3 – Localização dos trechos investigados nos quilômetros 378 da ferrovia no estado do Maranhão.

3.2 Equipamentos e configurações de aquisição

Foram utilizados sistemas GPR com antenas de frequência central de 400 MHz e o equipamento IDS Detector Duo, que opera simultaneamente em 250 e 700 MHz. A antena de 400 MHz foi empregada principalmente na investigação das camadas da via permanente, enquanto o sistema multifrequencial permitiu combinar maior profundidade de investigação no canal de 250 MHz com maior resolução superficial no canal de 700 MHz.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Nos quilômetros 378 e 673, os perfis de 400 MHz foram executados longitudinalmente, tanto no interior dos trilhos quanto em posições externas, ainda sobre os dormentes. No km 378, as aquisições cobriram aproximadamente 500 m em duas linhas férreas e foram complementadas por perfis laterais com o Detector Duo. No km 673, quatro perfis de 400 MHz cobriram o trecho entre 673+400 e 673+600, acompanhados por duas linhas laterais de 250/700 MHz.



Figura 4 – Configurações de aquisição utilizadas nos levantamentos: (a) antenas de 400 MHz na lateral da via; e (b) sistema Detector Duo 250/700 MHz operado na parte central.

No km 730, a aquisição com o Detector Duo foi priorizada fora do lastro, reduzindo a interferência dos dormentes e aproximando os perfis das trincas superficiais. Foram executadas duas linhas longitudinais, uma fora e outra sobre a trinca, além de 11 linhas transversais orientadas em direção ao trilho. Também foram realizadas aquisições complementares com antena de 400 MHz sobre a via.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A combinação entre perfis paralelos e transversais permitiu avaliar a repetição e a continuidade lateral das respostas. Essa estratégia foi especialmente importante nas proximidades da drenagem do km 673 e nas áreas fraturadas do km 730.

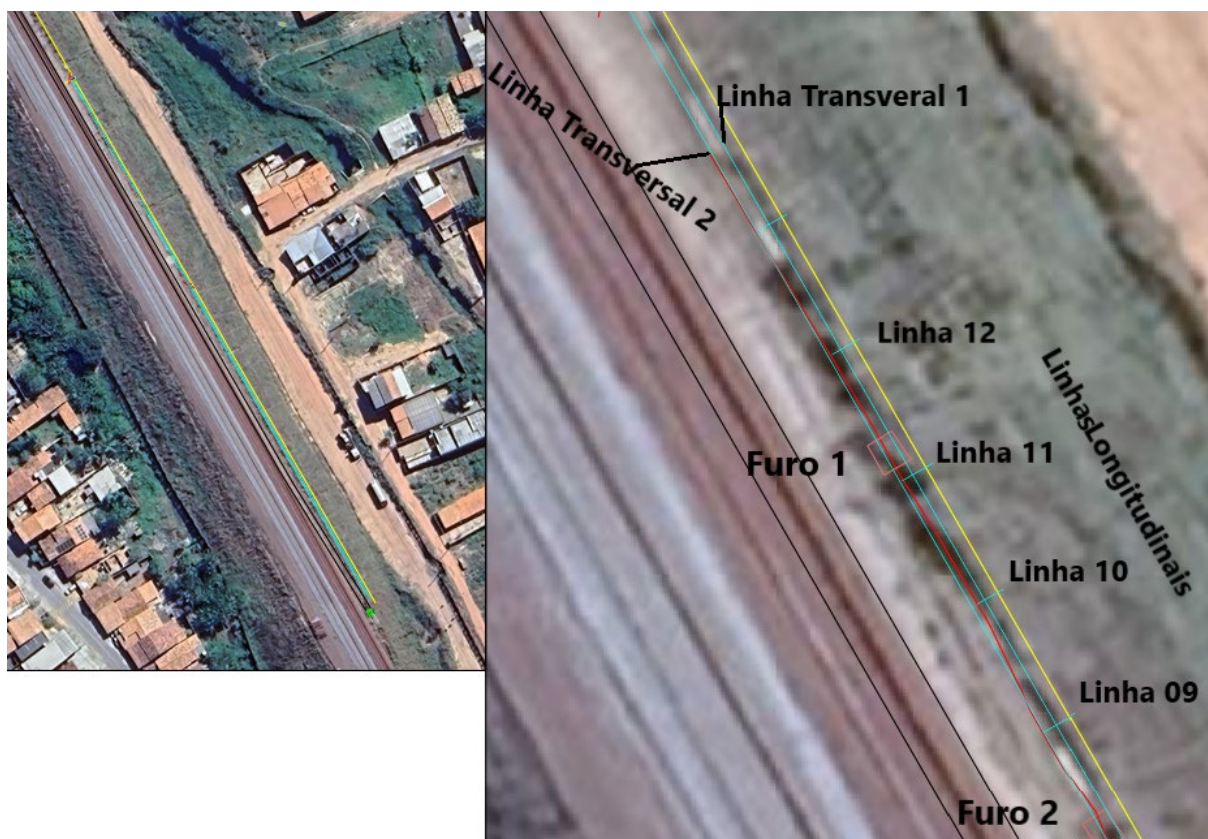


Figura 5 – Representação esquemática das posições dos perfis longitudinais e transversais em relação aos trilhos, dormentes e laterais do lastro.

3.3 Processamento e critérios de interpretação

Após a aquisição, os dados foram organizados por trecho, equipamento, frequência, posição e sentido de deslocamento. O processamento foi ajustado às características de cada conjunto e incluiu, conforme necessário, correção do tempo zero, filtragem em frequência, remoção de ruídos horizontais, aplicação de ganhos e conversão do tempo de propagação em profundidade aproximada. As respostas produzidas pelos trilhos, fixações e dormentes foram consideradas durante a análise.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A interpretação baseou-se na continuidade e na geometria das interfaces, na amplitude das reflexões, na presença de hipérboles, nas variações laterais do sinal e nas zonas de atenuação. Respostas repetidas em perfis paralelos foram consideradas mais representativas do que feições observadas em apenas uma linha. Nos perfis transversais, também foram avaliados o mergulho das interfaces e a direção das alterações em relação aos trilhos.

Os resultados foram correlacionados com drenagens, trincas, taludes, pontos de sondagem, áreas reparadas e demais elementos observados em campo. Assim, as respostas são apresentadas como compatíveis com umidade, fuga de material, deformação das interfaces, descontinuidades ou objetos enterrados. A confirmação da natureza de cada anomalia depende, quando necessária, de sondagens, escavações ou outras verificações geotécnicas diretas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Os levantamentos realizados nos quilômetros 378, 673 e 730 apresentaram respostas distintas, associadas às condições específicas de cada trecho. A comparação entre linhas paralelas, transversais e adquiridas com diferentes frequências permitiu avaliar a continuidade espacial das anomalias e diferenciá-las de respostas pontuais ou interferências próprias do ambiente ferroviário.

4.1 Investigação das camadas da via permanente no km 378

No km 378, a interpretação dos perfis indicou maior concentração de alterações na linha férrea L1, especialmente entre os marcos 378+020 e 378+180. Nesse intervalo, os quatro perfis de 400 MHz apresentaram deformação e perda de regularidade das interfaces associadas ao lastro e ao sublastro, formando uma zona rebaixada em relação aos trechos adjacentes. A repetição da resposta em linhas executadas em diferentes posições da via indica que a alteração possui continuidade lateral e não representa apenas uma ocorrência isolada.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 6 – Distribuição das linhas de aquisição e das principais zonas anômalas identificadas no km 378.

Nos radargramas, o trecho principal apresenta descontinuidade, mergulho e alteração da geometria dos refletores, acompanhados por respostas compatíveis com maior presença de umidade. Essas feições aparecem em perfis paralelos, ainda que com variações de intensidade relacionadas à posição das antenas em relação aos trilhos e dormentes. Também foram identificadas anomalias pontuais e setores com perda localizada da continuidade das camadas ao longo do segmento investigado.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

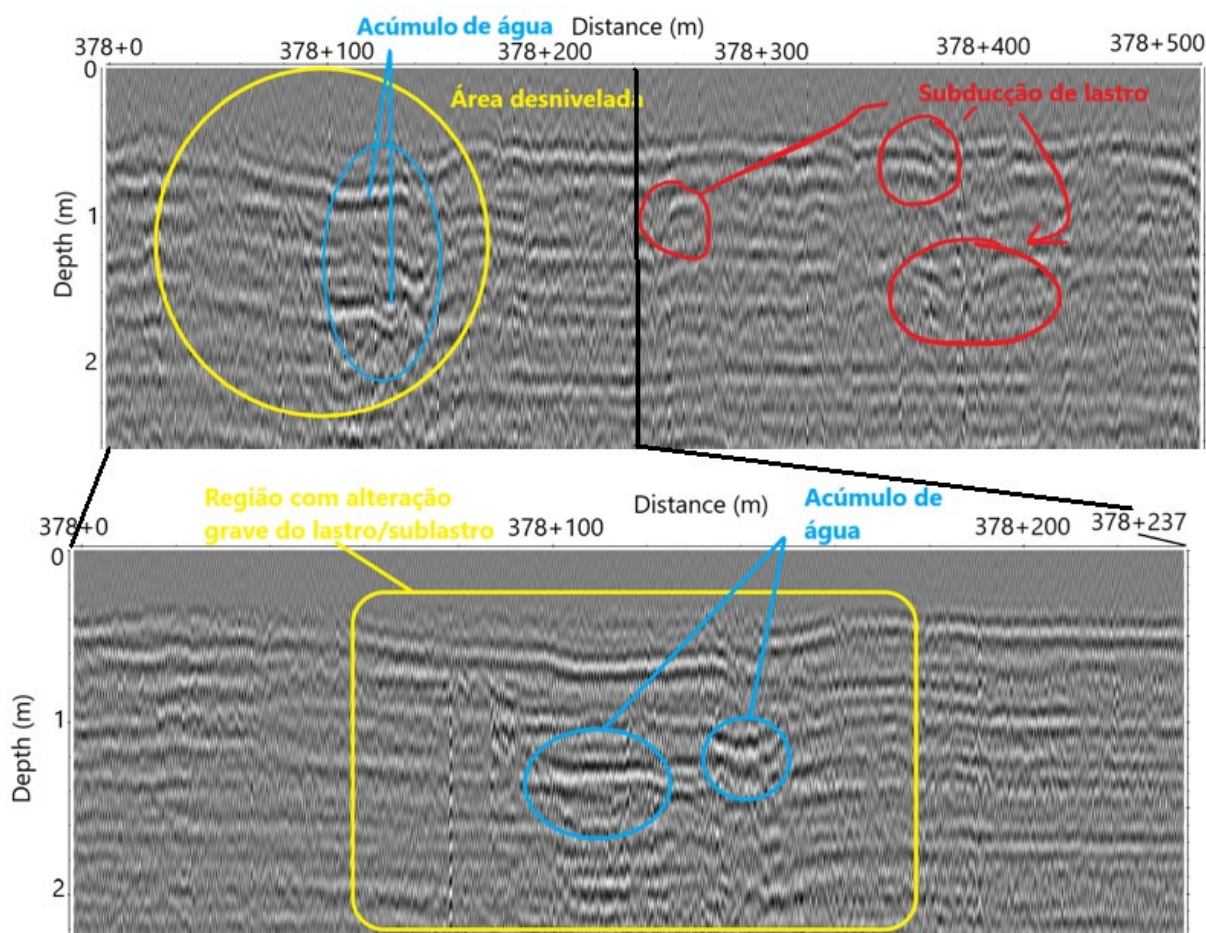


Figura 7 – Radargramas representativos de perfis paralelos sobre a linha férrea L1, mostrando o rebaixamento das interfaces e as respostas associadas à umidade entre os marcos 378+020 e 378+180: (a) trecho macro; e (b) zoom na parte úmida.

A relevância desse resultado é reforçada pelo histórico do local. No mesmo setor da linha L1 havia ocorrido anteriormente um colapso do material sob a ferrovia, seguido por intervenção corretiva. Mesmo após a recuperação do trecho, os perfis GPR ainda registraram irregularidades nas interfaces e respostas compatíveis com acúmulo residual de umidade. A coincidência espacial entre a ocorrência conhecida e a anomalia geofísica demonstra a capacidade do método para delimitar um setor que ainda exigia acompanhamento após a intervenção.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 8 – Fotografia aérea da área mais alterada do trecho 378, onde há uma cratera abaixo da linha férrea. Esta cratera está exatamente em 378+100.

Além da zona principal, foi observada uma concentração de anomalias entre aproximadamente 378+250 e 378+400. Essas respostas incluem deformações localizadas das interfaces e feições pontuais no lastro e no sublastro. Embora menos contínuas que a alteração identificada entre 378+020 e 378+180, elas indicam um segundo setor de interesse para inspeções complementares e acompanhamento da via.

4.2 Alterações associadas à drenagem no km 673

No km 673, a principal alteração foi identificada nas proximidades da estrutura de drenagem situada aproximadamente no marco 673+495. Os perfis adquiridos em diferentes posições da via mostraram mergulho das interfaces do lastro e do sublastro em direção à drenagem, além de zonas com respostas compatíveis com aumento da umidade. A repetição desse padrão nos perfis paralelos permitiu delimitar a extensão lateral da anomalia e relacioná-la espacialmente à estrutura existente.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A planta de resultados mostra que a alteração se distribui nos dois lados da drenagem, porém com geometrias distintas. Entre 673+447 e 673+495, observa-se um mergulho moderado associado a zonas de maior umidade. Entre 673+500 e 673+527, as interfaces apresentam rebaixamento mais acentuado, indicando maior deformação das camadas após a drenagem.



Figura 9 – Contexto e distribuição espacial das alterações no km 673.

Os perfis A1 e A2, adquiridos com o Detector Duo, apresentam de forma clara a variação da geometria das interfaces. Antes da drenagem, entre aproximadamente 673+447 e 673+495, o sublastro apresenta rebaixamento da ordem de 1,5 m ao longo de cerca de 40 m. Nesse setor também foram identificadas respostas associadas à presença de água. Após a drenagem, entre 673+500 e 673+527, o mergulho ocorre de maneira mais acentuada, com eventos interpretados em profundidades aproximadas entre 1 e 4 m.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

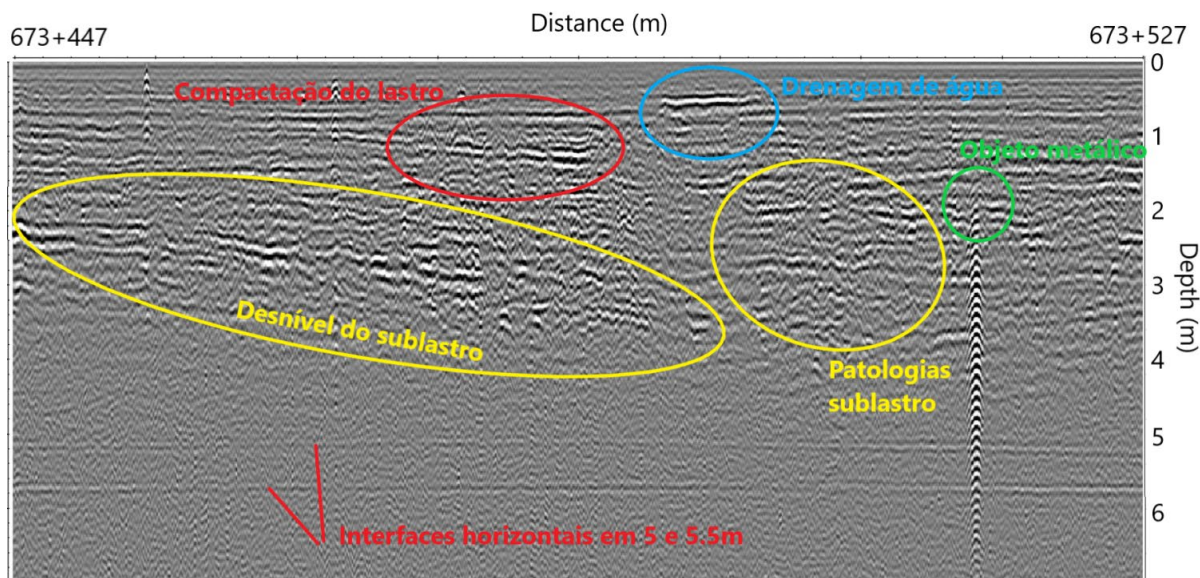


Figura 10 – Radargrama A1 adquirido com o sistema Detector Duo no km 673.

Os perfis de 400 MHz confirmaram que a alteração central não estava restrita às linhas laterais adquiridas com o Detector Duo. Nos radargramas principais foram observadas zonas de maior umidade entre aproximadamente 673+430 e 673+450 e entre 673+500 e 673+540. Nas linhas D1, E1 e D2 também foi registrada uma segunda descontinuidade entre 673+550 e 673+590, indicando alteração localizada do sublastro além da região central.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

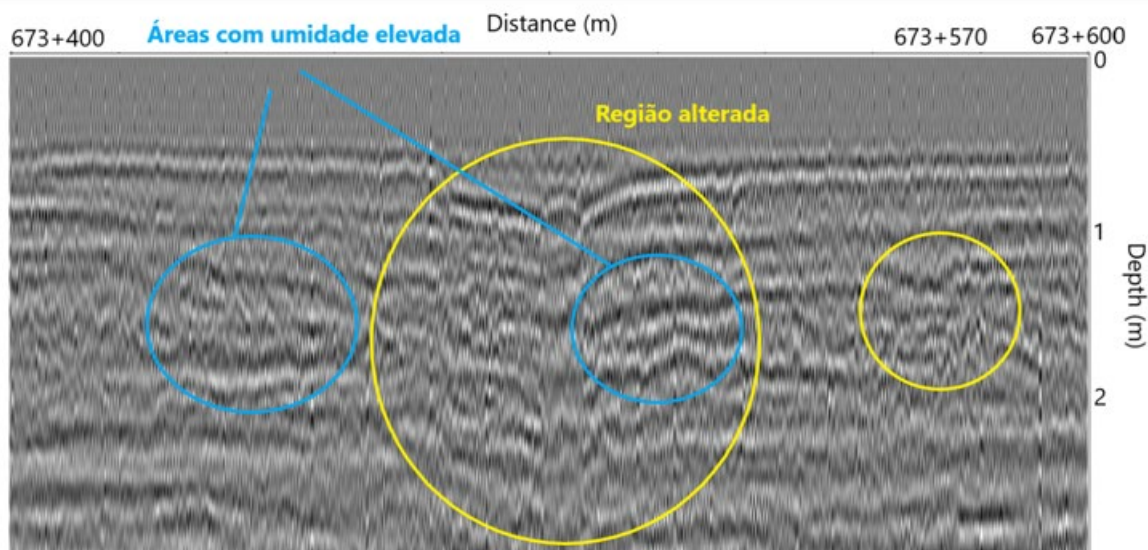


Figura 11 – Perfil de 400 MHz GSSI selecionado no km 673, mostrando a repetição da alteração central e das zonas de maior umidade em diferentes posições da via. Abaixo, a galeria onde supostamente havia vazamento de fluidos no sublastro da ferrovia.

A correlação espacial entre o mergulho das interfaces, as respostas associadas à umidade e a posição da drenagem indica que o comportamento hidráulico do trecho influencia diretamente as camadas da via. Entretanto, os dados GPR não permitem determinar isoladamente se o rebaixamento resulta de fuga de material, compactação deficiente, erosão interna ou da combinação desses processos. O resultado delimita, porém, a região prioritária para avaliação da drenagem e verificação geotécnica.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.3 Investigação de trincas e migração de material no km 730

No km 730, os resultados foram analisados a partir da comparação entre perfis executados sobre as trincas, fora delas e transversalmente em direção ao trilho. Essa configuração permitiu avaliar não apenas a resposta diretamente associada às feições superficiais, mas também sua possível continuidade lateral.

A linha longitudinal L2, executada diretamente sobre a trinca, apresentou uma zona de forte atenuação entre aproximadamente 10 e 70 m. A partir de cerca de 1,5 m de profundidade, a perda de energia dificultou a interpretação das interfaces, embora o equipamento investigasse até aproximadamente 3 m. A intensidade e a extensão dessa resposta são compatíveis com maior concentração do material injetado ou com alteração do meio diretamente abaixo da trinca.

Na linha L1, executada fora da trinca, também foi observada atenuação, porém menos intensa, entre aproximadamente 20 e 70 m. A presença da mesma resposta em um perfil lateral indica que a alteração não se restringe à abertura visível em superfície. Uma hipótese compatível com os dados é a migração lateral do material de preenchimento por discontinuidades existentes no terreno.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 12 – Contexto da investigação no km 730: (a) trincas observadas no trecho; e (b) Levantamento GPR com Detector Duo para verificar extensão das trincas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

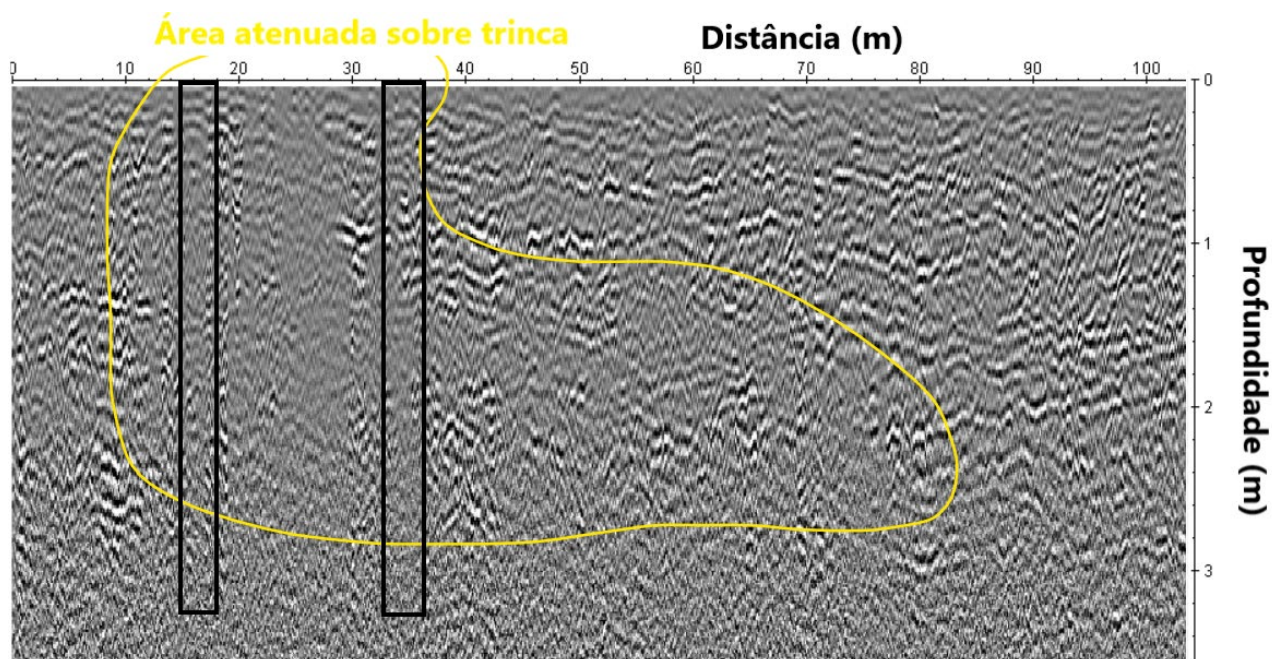


Figura 13 – Radargrama referente à Linha L2, executada sobre a trinca, com atenuação mais intensa e extensa.

A diferença entre L1 e L2 constitui o principal resultado desse estudo de caso. A maior atenuação sobre a trinca confirma que a alteração eletromagnética está concentrada nessa zona, enquanto sua presença na linha adjacente demonstra extensão lateral além da feição superficial.

Os perfis transversais também registraram comportamentos distintos. A linha T11, localizada próxima a um dos pontos de sondagem, apresentou estratificação relativamente contínua e ausência de atenuação significativa, funcionando como referência. Em contraste, as linhas T9 e T10, situadas entre os dois pontos de sondagem, mostraram atenuação e refletores inclinados que se tornam mais rasos em direção ao trilho. Padrão semelhante foi observado nas linhas T6 e T8, pertencentes ao segundo conjunto de trincas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

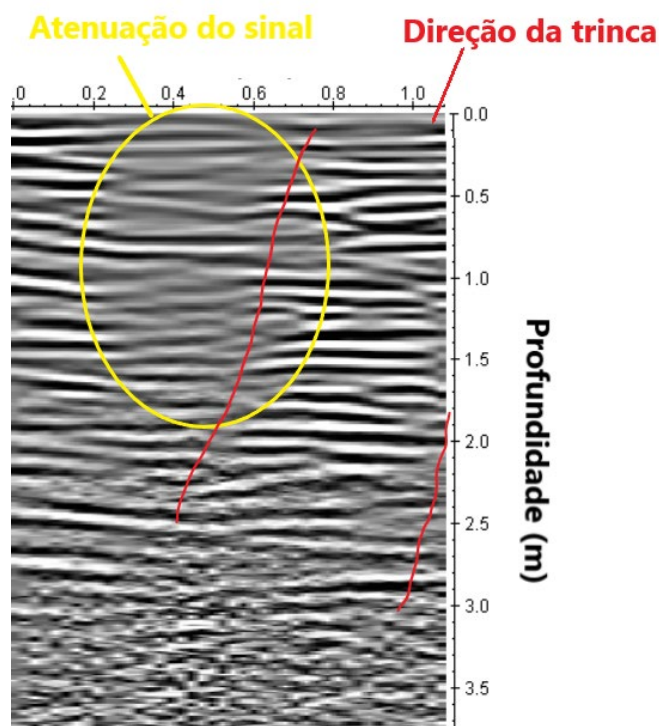


Figura 14 – Perfil Transversal à via, realizado sobre a fissura evidenciando zona atenuada e a direção da trinca observada em superfície.

A repetição da resposta em diferentes conjuntos sugere a continuidade lateral de descontinuidades inclinadas e a possibilidade de deslocamento do material de preenchimento para fora da trinca principal. Embora a natureza exata das feições dependa de confirmação direta, os radargramas demonstraram que a área afetada é mais ampla que aquela delimitada apenas pelas manifestações visíveis em superfície.

4.4 Comparação entre os estudos de caso

Os três levantamentos demonstram diferentes formas de aplicação do GPR na infraestrutura ferroviária. No km 378, o principal resultado foi a identificação de uma zona contínua de deformação das interfaces em um trecho com histórico de colapso e intervenção. No km 673, a distribuição das anomalias indicou relação espacial entre a drenagem, o mergulho das camadas e as zonas de maior umidade. No km 730, a combinação de perfis longitudinais e



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

transversais permitiu acompanhar a extensão de trincas e zonas de atenuação além das manifestações superficiais.

Tabela 1 – Síntese comparativa dos resultados obtidos nos três estudos de caso.

Trecho	Problema investigado	Principal resposta GPR	Contribuição do levantamento
km 378	Alterações nas camadas da via e histórico de colapso	Rebaixamento contínuo das interfaces e respostas associadas à umidade	Delimitação do trecho crítico e identificação de alterações residuais
km 673	Comportamento da via próximo a uma drenagem	Mergulho do lastro e sublastro e zonas de maior umidade	Relação espacial entre drenagem e deformação das camadas
km 730	Trincas e infiltração de material de preenchimento	Atenuação intensa sobre as trincas e continuidade lateral em perfis transversais	Definição da extensão subsuperficial das alterações

Em todos os casos, a interpretação se tornou mais consistente quando a mesma resposta foi identificada em mais de um perfil. A comparação entre linhas paralelas permitiu verificar a continuidade lateral das zonas alteradas, enquanto os perfis transversais contribuíram para determinar sua orientação em relação à ferrovia. A utilização de diferentes frequências também possibilitou combinar maior detalhamento das camadas superficiais com maior profundidade de investigação.

4.5 Contribuições e limitações dos levantamentos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os resultados mostram que o GPR pode fornecer informações contínuas sobre as condições internas da via permanente e delimitar setores prioritários para inspeção, sondagem ou intervenção. O método apresentou capacidade para identificar deformações das interfaces, zonas de atenuação, respostas associadas à umidade e descontinuidades que não poderiam ser completamente avaliadas apenas por inspeções superficiais.

Entretanto, as respostas eletromagnéticas não confirmam isoladamente a natureza geotécnica das ocorrências. Água, materiais finos, argilas, preenchimentos e alterações de compactação podem produzir respostas semelhantes, enquanto trilhos, dormentes e componentes metálicos geram interferências características. Por isso, o principal valor do GPR está na delimitação espacial das alterações e na orientação de investigações diretas, devendo seus resultados ser integrados ao histórico do trecho, às inspeções de campo e aos dados geotécnicos disponíveis.

5. Conclusões

Os resultados apresentados demonstram que o Ground Penetrating Radar constitui uma ferramenta adequada para a investigação não destrutiva das camadas da via permanente. A aquisição de perfis contínuos permitiu identificar variações na geometria das interfaces, zonas de atenuação eletromagnética, respostas associadas à umidade e descontinuidades que não poderiam ser completamente avaliadas apenas por inspeções superficiais ou investigações pontuais.

No km 378, a repetição das anomalias em diferentes perfis permitiu delimitar um trecho com rebaixamento das interfaces do lastro e do sublastro, associado a respostas compatíveis com maior presença de umidade. A coincidência dessa zona com uma área anteriormente submetida a intervenção reforçou a importância do acompanhamento do trecho após a execução das medidas corretivas. No km 673, os radargramas mostraram mergulho das interfaces em direção à estrutura de drenagem, acompanhado por zonas de maior umidade e alterações localizadas no sublastro. Já no km 730, a comparação entre linhas executadas sobre



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

e fora das trincas demonstrou maior atenuação na região diretamente afetada, enquanto os perfis transversais indicaram que as alterações se prolongavam lateralmente além das manifestações visíveis em superfície.

A utilização de diferentes frequências e posições de aquisição foi importante para a interpretação dos resultados. As antenas de 400 MHz possibilitaram acompanhar as camadas da via em perfis longitudinais, enquanto o sistema multifrequencial de 250/700 MHz permitiu maior detalhamento das áreas laterais e de feições localizadas. A comparação entre perfis paralelos contribuiu para verificar a continuidade lateral das respostas, e as linhas transversais auxiliaram na avaliação da direção das alterações em relação aos trilhos.

Os estudos também evidenciam que uma anomalia GPR não corresponde, de forma automática, a uma patologia geotécnica específica. Materiais úmidos, partículas finas, alterações de compactação, preenchimentos e diferentes tipos de solo podem produzir respostas semelhantes. Além disso, trilhos, dormentes, fixações e outros componentes da ferrovia podem gerar interferências nos radargramas. Por isso, a interpretação deve considerar a geometria e a repetição das respostas, as condições observadas em campo, o histórico do trecho e, quando necessário, verificações diretas por meio de sondagens, escavações ou outras investigações geotécnicas.

Conclui-se que a principal contribuição do GPR para a engenharia ferroviária está na ampliação da continuidade espacial das informações sobre a subsuperfície. O método permite delimitar setores prioritários, orientar a localização de investigações diretas e reduzir intervenções exploratórias executadas sem conhecimento prévio da extensão das alterações. Quando empregado de forma integrada às inspeções e aos dados geotécnicos, o GPR pode apoiar o diagnóstico, o planejamento da manutenção e o monitoramento de trechos ferroviários submetidos a processos de degradação ou intervenções corretivas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Referências

DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar**. 2. ed. London: Institution of Electrical Engineers, 2004.

JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar Principles, Procedures and Applications**. Mississauga: Sensors & Software Inc., 2005.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6432-19: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

AREMA. **Manual for Railway Engineering**. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2026.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. London: Thomas Telford, 1994.

HUGENSCHMIDT, J. Railway track inspection using GPR. **Journal of Applied Geophysics**, v. 43, n. 2-4, p. 147-155, 2000.

LENG, Z.; AL-QADI, I. L. Railroad ballast evaluation using ground-penetrating radar. **Transportation Research Record**, n. 2159, p. 110-117, 2010.

SILVAST, M.; NURMIKOLU, A.; WILJANEN, B.; LEVOMÄKI, M. An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 224, n. 5, p. 345-351, 2010.

BENEDETTO, A. et al. Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar. **Construction and Building Materials**, 2017.

WANG, S. et al. State-of-the-art review of ground penetrating radar for railway ballast inspection. **Sensors**, v. 22, n. 7, 2450, 2022.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

GUO, Y. et al. Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar. **Railway Engineering Science**, 2023.

Essas referências cobrem o núcleo do artigo: fundamentos do GPR, norma ASTM, engenharia ferroviária, lastro, fouling, umidade e manutenção baseada em condição. O uso do GPR como método com ondas EM de 10 a 3000 MHz e seu escopo de procedimentos de campo/processamento estão alinhados à ASTM D6432-19. ([ASTM International](#)) A aplicação em lastro ferroviário, fouling e manutenção preventiva é sustentada por estudos como Silvast et al. e revisões recentes. ([Sage Journals](#))